

平成 30 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14151

研究課題名(和文) 磁性流体流動界面放電による汚染ナノ粒子・ミストの拡散抑制および浄化技術の開発

研究課題名(英文) Diffusion Suppression of Polluted Nano Particles and Mist using Discharge on the Moving Magnetic Fluid Interface and Development of Purification Technology

研究代表者

西山 秀哉 (NISHIYAMA, Hideya)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：20156128

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)： 磁性流体の流動性と界面吸着性の活用による浮遊微粒子回収用の革新的プレフィルターの開発を目的として、磁性流体スパイクを流路床に保持した流動微粒子吸着デバイスを試作した。磁場および搬送空気流量による浮遊流動微粒子の吸着効率および磁場による磁性流体スパイク高さや体積、気流による磁性流体スパイクの移動度も明らかにした。微粒子吸着効率の増加のためには、弱磁場で磁性流体スパイクの高さや体積も大きく、しなやかななびきが関連することを示した。また、気流による磁性流体スパイク群の前方から後方への循環移動更新が観察された。

研究成果の概要(英文)： The dispersed flowing particle collection device using magnetic fluid was developed, which can be controlled by magnetic field. High adsorption efficiency of particles was achieved by small magnetic flux density and small carrying air flow rate. It was found that the adsorption efficiency is strongly influenced by the mobility and interface area of magnetic fluid spike with flowing. The velocity field around the magnetic fluid spikes and its movements were also visualized by relating to particle adsorption characteristics.

研究分野：工学

キーワード：機能性流体 磁性流体 液体界面 放電 浄化技術 ナノ粒子 ミスト

1. 研究開始当初の背景

(1) 21世紀では、中国からの有害PMや汚染黄砂の飛来、春先の花粉の飛散、ディーゼルエンジン排気ガスのスス、また、室内汚染物質、インフルエンザウイルス等の浮遊や高濃縮化に伴う人間の生活環境を取り巻くナノ・マイクロスケールのダスト粒子やミストによる汚染とアレルギー、インフルエンザ、エボラ出血熱や肺ガン等の健康被害が深刻な問題となってきた。近年、空気清浄技術としてプラズマクラスターやストリーマ放電による滅菌、汚染粒子やミストの捕集、汚染物質の酸化分解等の開発が空調メーカーを中心に活発である。しかしながら、応用研究や技術が先行しているため、学術的な裏付けや普遍性の検証、さらには、実験と計算の両面からの統合解析により最適化されていないのが現状である。

(2) 本代表者は、最近、管内誘電体バリア放電によるプラズマアクチュエータ効果でナノ粒子を輸送し、オゾンで粒子表面の酸化分解にも成功し、特許登録(56670026、5688651)と2012年度日本混相流学会技術賞を受賞している。また、管内反応性プラズマ流中に酢酸を噴霧し、高効率分解にも成功した。本研究では、本代表者らのストリーマ放電による空気の活性化、反応性促進の成果を進展させ、プラズマと磁性流体界面をマイクロ放電領域とした静電場やイオン風によるミスト・ダスト輸送およびオゾン、ラジカルによるウイルスの不活化、磁性流体流動界面による吸着捕集への研究展開に成果が期待されており、「ミスト・ダスト汚染環境の浄化・捕集」で、IOPのJ. Phys. + News and Viewsにも取り上げられている。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、室内微小空間、呼吸器系でのウイルス、汚染ナノ粒子、ハウスダスト、ミストの拡散抑制、これらの不活化、表面汚染物質分解・吸着捕集への先進的応用展開を目的とする。

(2) 人間環境に低負荷な磁性流体界面放電下で静電気力やイオン風によるミスト・ダストの拡散抑制およびプラズマのラジカル、オゾンの強酸化力により汚染ミスト・ダストを酸化分解、ウイルスの不活化、磁性流体流動界面で吸着捕集する「革新的技術」を開発する。

(3) 「ミスト・ダスト静電輸送モデル」と「磁性流体界面流動反応モデル」を統合した新規な「ナノミスト・ダスト反応混相流動モデル」を世界に先駆けて提案し、ウイルス・ミスト・ダストの輸送、浄化、捕集特性を明らかにし、実験との統合解析により最適形態や作動条件を示し、「革新的空気清浄器」開発の

ための基礎的設計資料を提供する。

3. 研究の方法

(1) 磁性流体界面電極によるストリーマ放電とコロナ放電のイオン風より、ウイルスやミスト・ダストを拡散抑制し、分解、流動する磁性流体界面に吸着捕集するための「プラズマ-磁性流体界面流動反応浄化システム」を試作する。

(2) 放電条件、磁場強度、流動場、ミスト・ダスト径やウイルス・ミスト・ダスト濃度、イオン風速度、反応炉形状やスケールとミスト・ダストの吸着捕集効率、表面汚染物質の分解効率やウイルス死滅効率との相関およびエネルギー効率を実験的に明らかにする。

(3) 「ミスト・ダスト静電輸送モデル」と「磁性流体流動界面反応モデル」を統合した新規なモデルによりウイルス死滅、ミスト・ダスト吸着、分解・除去最大効率のための作動条件やリアクター形状の最適化を行い、「革新的空気浄化システム」を開発する。

4. 研究成果

(1) 実験装置を制作した。アクリル製の40×250×10mm矩形流路後方150mm下部に表面磁束密度が2110Gの50×50×10mmネオジム磁石を設置し、ケロシンベース磁性流体(HC-50、タイホーコーザイ)3mLを保持した。矩形流路には、マイクロフィーダー(TF-70-EC、アイシンナノテクノロジーズ社)を通して模擬微粒子を混合した空気が流入する。空気の流量は、マスフローコントローラ(MC-50SLPM-D、Alicat社)で25NL/minおよび20NL/minに調節した。矩形流路、ネオジム磁石および磁性流体は、図1に示すよ

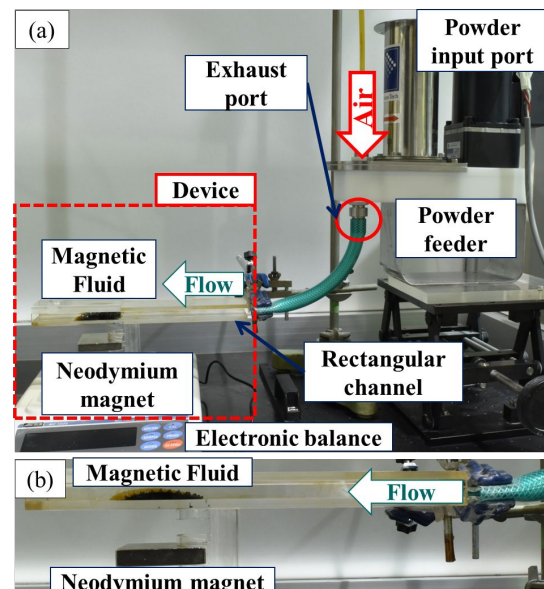


図1 実験装置

うに、マスコンパレータ (MC-1000、エー・アンド・デイ社) 上に設置されており、流入した微粒子は、磁性流体スパイクに吸着すると、その吸着量を重量として計測できる。測定された重量を PC に出力し取得した。模擬微粒子は、フラワー薄力小麦粉 (日清製粉グループ) を定温乾燥機 (ON-450、AS ONE 社) にて、80 で 2 時間乾燥させたものを使用した。微粒子供給量 Q は、0.11 g/s である。ネオジム磁石上面 - 磁性流体間距離を変化させた際の微粒子吸着量を測定した。このときの流路底面における磁束密度 B_0 を Gauss 計測器 (Model 5080、F. W. BELL 社) で計測し、それぞれ 1850 G、1518 G および 700 G であった (図 1)。

(2) 微粒子搬送空気量が 25 NL/min および 20 NL/min において、 $B_0 = 1850$ G、1518 G および 700 G のときの経過時間と 1 秒ごとの微粒子回収効率との関係を検討した。但し、得られたデータから外れ値は除外した。実験中、磁性流体スパイクは、気流からの力を受け流動変形しながら、微粒子を吸着していた。微粒子回収効率は、次に示す式 (1) を用いて導出した。

Adsorption efficiency

$$= \frac{M_{\text{adsorption}}(t + \Delta t) - M_{\text{adsorption}}(t)}{Q \Delta t} \quad (1)$$

ここで、 $M_{\text{adsorption}}(t)$ は、時間 t における微粒子回収総量を表す。どの磁束密度においても時間の経過と共に微粒子回収量が低下する傾向が見られ、その低下割合は徐々に緩やかになる。また、磁束密度の小さい方が全体を通して高い微粒子回収効率を示し、時間が経過しても高い微粒子回収効率を維持する。これは、今回使用した磁束密度の中では、磁束密度が小さい方が形成される 1 つのスパイク体積が大きく、磁石による磁気引力が弱いために微粒子混合空気の流動によって磁性流体界面が大きくなびき、見かけの表面積が大きくなるためと考えられる。さらに、微粒子が付着すると、磁性流体スパイクはその流動性を失い、微粒子吸着特性が減少する。磁束密度が小さい方がスパイク界面の流動性が高く、微粒子回収能力を維持できることも原因と考えられる (図 2) (図 3)。

(3) 種々の磁場強度に対する磁性流体スパイクの断面形状について検討した。磁場強度は、マイクロステージを用いて流路圧部から永久磁石の位置まで変化させることにより制御した。永久磁石を用いた理由は、消費エネルギーが小さいためである。磁場が強くなるにつれ、磁性流体スパイクの高さと大きさが小さくなる (図 4)。

(4) 磁性流体スパイクの高さと投影断面横

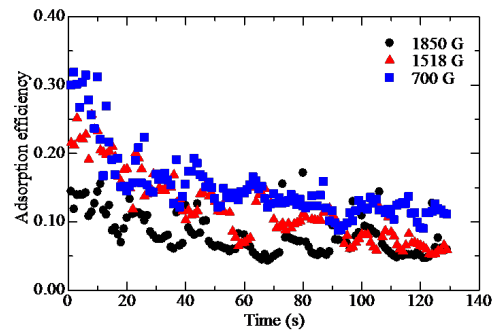


図 2 微粒子吸着効率 (25 NL/min)

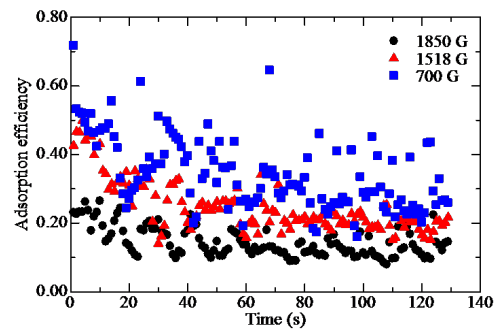


図 3 微粒子吸着効率 (20 NL/min)

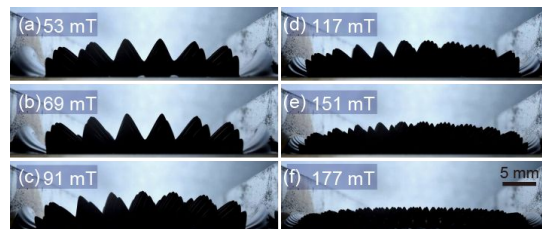


図 4 磁場強度に対する磁性流体スパイクの断面形状

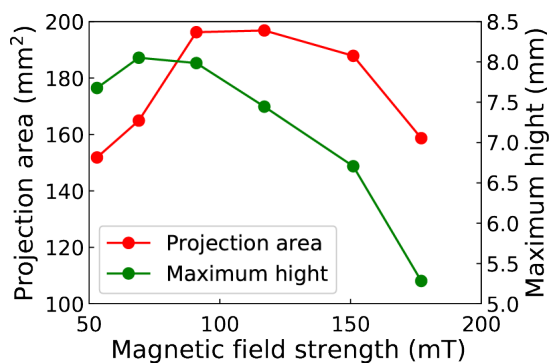


図 5 磁場強度に対する磁性流体スパイクの投影面積と高さ

の磁場による変化を検討した。最初、磁場強度の増加に伴い、磁性流体スパイクは高くなるが、70 mT 以下だとより強い磁気双極子相互作用のために、磁気微粒子が流路底部により引きつけられ、表面張力、磁気力と重力のバランスで高さが減少し、磁性流体スパイクの数が増加する。しかし、磁性流体スパイク

の静的な特性が必ずしも微粒子吸着効率とは対応しない(図5)。

(5) 微粒子の吸着効率には、むしろ磁性流体スパイクの動的応答が関与していると考えられるので、気流による磁性流体スパイクの移動度に関して検討した。明るい点はスパイクの移動が活発で、暗い点はスパイクがあまり移動しないことを示す。強磁場下では、粒子間磁気双極子相互作用は強いので、中心領域の磁性流体スパイクの移動度は小さい。一方、弱磁場下では、全体の磁性流体スパイクは相対的に一様に移動する。最も小さな磁場下では、磁性流体スパイクの運動は、極端に大きい(図6(e)(f))。

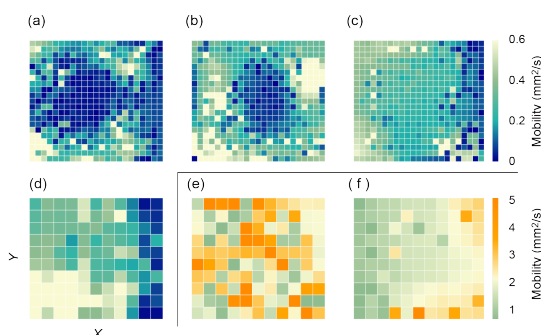


図6 磁場に対する磁性流体スパイクの移動度

(6) PIV を用いて磁性流体スパイクまわりの微粒子混合空気の流れを可視化した。スパイク先端付近の局所的に大きなベクトルは、スパイクに反射したレーザー光を観測したものであると思われる。微粒子を含む空気は、最前面のスパイクに衝突後、スパイクを避けるように上方へ向かって流れていることがわかる。また、目視による観察では、気流から力を受け、磁性流体スパイク自体が磁場で保持されたまま前面部のスパイクが側面を経由し後方へ移動し、中央部を通して前面部に回帰するような斜傾スパイクの循環流動が確認できた。これにより、今回の装置における微粒子吸着メカニズムとして、気流に乗った微粒子が磁性流体最前部に衝突した際に磁性流体に吸着し、後方に輸送されているということが考えられる。磁性流体は、粒子をスパイク表面に吸着するとともに、気流によって後方へ輸送される。それに伴い、重力、磁場による磁気体積力および表面張力のつり合いから、スパイクが更新される。これを繰り返すことで微粒子を新たに吸着していると考えられる。また、磁性流体は、微粒子を吸着することで粘度が増大し、次第に流動しにくくなるために、時間経過とともに微粒子回収効率は低下すると考えられる。そのため、微粒子回収効率には、磁性流体最前面の界面流動が非常に重要な影響を与えていると考えられる(図7)。

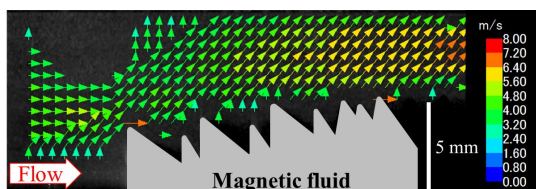


図7 磁性流体スパイク周りの流動場

(7) 以上、磁性流体スパイクのプレフィルターの適用にあたっては、スパイクの流動性と微粒子が吸着したスパイク部位の更新、さらには、流路内での磁性流体スパイクの固定化と圧力損失の低減が重要な因子となる。将来の研究展開では、流路内壁全面に磁性流体スパイクを付着するための流路構造と微粒子を吸着した磁性流体の回収方法も研究対象になると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

Satoshi Uehara, Tomonori Itoga and Hideya Nishiyama, Internal Flow in a Liquid Film Induced by Ionic Wind, The Reports of the Institute of Fluid Science, Tohoku University, 査読無, Vol.30 (2018), in press.

〔学会発表〕(計 7件)

西山秀哉, MR流体および磁性流体の機能流動研究, 平成29年度磁性流体連合講演会, (2017)。

上原聡司, 木内望早来, 西山秀哉, 磁性流体を用いた微粒子回収デバイスにおける周囲気流と界面流動, 平成29年度磁性流体連合講演会, (2017)。

Misaki Kiuchi, Satoshi Uehara and Hideya Nishiyama, Influence of Magnetic Fluid Interface Flow on Particle Adsorption Efficiency, 14th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2017), (2017)。

上原聡司, 木内望早来, 西山秀哉, 磁性流体を用いた微粒子回収デバイス内の周囲気流による界面流動, 日本機械学会2017年度年次大会, (2017)。

木内望早来, 上原聡司, 西山秀哉, 磁性流体スパイクを用いた微粒子の回収と界面流動, 混相流シンポジウム, (2017)。

系賀友則, 上原聡司, 西山秀哉, 放電下における液膜内部流動および界面挙動の実験解析, 日本機械学会第94期流体工学部門講演会, (2016)。

Tomonori Itoga, Satoshi Uehara and Hideya Nishiyama, Experimental Study on Internal Flow and Interface Behavior of Liquid Film with Atmospheric Plasma, 13th International Conference on Flow

Dynamics (ICFD2016), (2016).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/nishiyama-lab/homepage-old/japanese.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西山 秀哉 (NISHIYAMA, Hideya)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：20156128

(2) 研究分担者

上原 聡司 (UEHARA, Satoshi)

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：70742394